

Ю. С. Протасов, Ю. Ю. Протасов,
В. В. Христофоров, А. М. Семенов,
А. А. Фарафонов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ СРЕД ВТОРИЧНЫХ СТАНДАРТОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ В УФ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Приведены результаты экспериментального и расчетно-теоретического определения коэффициентов поглощения в коротковолновой области спектра газовой-плазменных активных сред сложного химического и ионизационного состава вторичных стандартов спектральной яркости на основе приповерхностной лазерной (светоэрозионной) плазмы.

Исследование спектральных коэффициентов непрерывного поглощения газоплазменных активных сред вторичных стандартов спектральной яркости в УФ–ВУФ диапазоне спектра с яркостной температурой 2...10 эВ является необходимым для определения степени отклонения излучения эталонных источников от излучения абсолютно черного тела в коротковолновой части спектра и эффективности преобразования энергии теплового широкополосного излучения в различных участках спектра. К этим стандартам спектральной яркости высокой плотности мощности несинхротронного типа относят: капиллярные разряды с испаряющейся стенкой, источники с лазерной плазмой, плазмодинамические эксилампы [1, 2], использующие различные формы оптических разрядов в газах и средах сложного химического и ионизационного состава.

Эффективность преобразования энергии на стадиях генерации и нагрева активной излучающей среды в разрядных ячейках большинства форм (и режимов) лазерно-индуцированных оптических эрозионных разрядов в значительной степени определяется возможностью управления их эмиссионными характеристиками и динамикой коэффициента поглощения. Так, в стандартных излучателях на основе лазерной плазмы при интенсивностях лазерного излучения, превышающих пороговые значения для плазмообразования, у поверхности аблирующей мишени происходит переход волны развитого испарения в зоне облучения в волну термической ионизации [3, 4], что в зависимости от регулировочных параметров воздействия (длины волны, спектральной плотности мощности и энергии теплового или когерентного излучения, давления среды, оптических характеристик облучаемой мишени и др.) приводит к модификации различных форм оптических эрозионных разрядов с развитой ударно-волновой структурой. Нагреваемая до температур $T_{пл} > 1 \text{ эВ}$

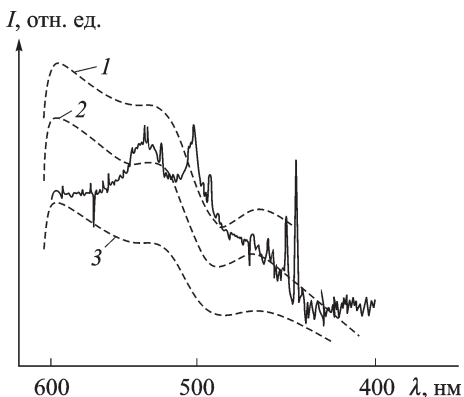


Рис. 1. Денситограммы эмиссионных спектров при $I_0 \sim 10^7$ Вт/см², (СН₂О)_n-мишени; штриховые кривые соответствуют равновесному планковскому распределению при разных температурах 25 кК (1), 20 кК (2), 15 кК (3)

временной динамикой существенно не только для анализа конкурирующих механизмов термофотодеструкции плазмообразующих полимеров, но и для количественного описания и оптимизации активной стадии генерации рабочего вещества в спектральных конверторах когерентного излучения, поэтому исследование эмиссионных свойств приповерхностной лазерной плазмы в коротковолновой области ($h\nu > 6$ эВ) представляет как общефизический, так и практический интерес. Далее кратко приведены результаты экспериментального исследования спектрально-яркостных характеристик приповерхностной лазерной эрозионной плазмы в вакууме на основе элементов полимерного ряда, в рекомбинирующей плазме которых не содержатся в газообразных продуктах разложения макрочастицы углерода в свободном состоянии (плазменная пыль).

Условия и результаты экспериментов. Схема измерительного модуля установки приведена на рис. 2. Генерация лазерной плазмы в вакуумных условиях ($p_0 \sim 10$ Па) проводилась при облучении плоской полимерной мишени лазерным излучением ($\lambda_r \sim 1,06$ мкм, $\tau_n \sim 10^{-5}$ с, $E_u/S_0 \sim 10^4$ Дж/см²) с плотностью мощности $10^6 \dots 10^8$ Вт/см² в режиме неострой фокусировки. Цилиндрическая мишенная камера такого источника содержит аблирующие (С₂Ф₄)_n-, (СН₂О)_n-мишени диаметром 5...10 мм, облучаемые через каналы ввода лазерного излучения с фокусирующей оптикой, а отбор излучения происходит по оси системы. В УФ диапазоне спектра измерения спектральных коэффициентов поглощения лазерной плазмы сложного химического состава проводились при ее зондировании лазерным

лазерная плазма поглощенную энергию широкополосного или монохроматического излучения переизлучает в широком спектральном интервале (рис. 1), что оказывает существенное влияние на радиационно-газодинамические процессы и ее макроструктуру, динамику фазовых переходов, тепловых и радиационных волн в приповерхностной аблирующей зоне и изменение массового расхода $\dot{m}(t)$ вещества в газоплазменной фазе. Отметим также, что выяснение взаимосвязи эмиссионных характеристик приповерхностной (лазерной) плазмы с ее пространственно-

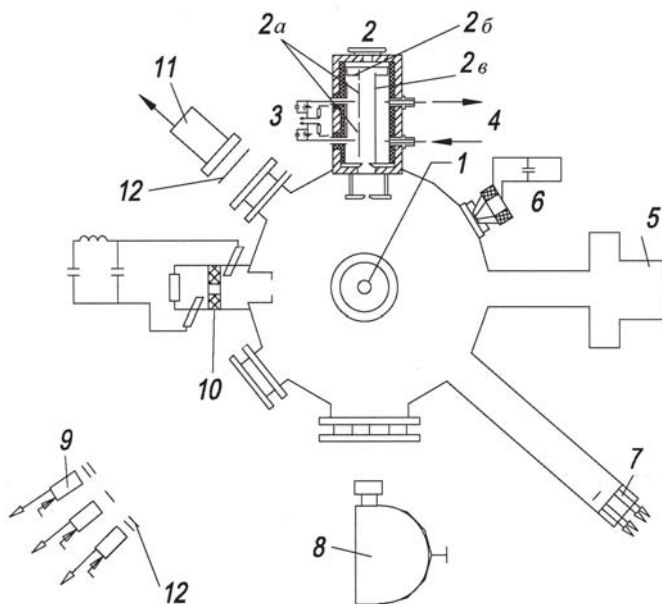


Рис. 2. Схема диагностического модуля для исследования эмиссионных характеристик лазерной эрозионной плазмы:

1 — мишенная камера; 2 — двойная ионизационная камера, 2а — собирающие электроды, 2б — ионоотталкивающий (положительный) электрод, 2в — защитный электрод; 3 — схема электропитания; 4 — газовакуумный тракт, 5 — монохроматор ВМР-3А с фотоэлектрической регистрацией; 6 — вакуумный эрозионный излучатель; 7 — блок металлических болометров; 8 — скоростной фоторегистратор; 9 — фотоэлектрические приемники; 10 — вакуумный эталон яркости на основе капиллярного разряда с испаряющейся стенкой; 11 — калориметр; 12 — оптические фильтры

излучением и излучением спектрально более яркого источника на основе широкополосного излучателя ИСИ-1 (как вторичного плазменного стандарта УФ спектральной яркости). Спектральные коэффициенты поглощения в видимом и ближнем ИК диапазонах определялись как при зондировании плазмы более ярким источником излучения, так и при измерении абсолютной интенсивности излучения слоя плазмы заданной длины. Поскольку температура, давление и химический состав приповерхностной лазерной плазмы были измерены с достаточной степенью точности, то оказалось возможным провести сравнительный анализ спектральных коэффициентов поглощения при свободно-свободных и свободно-связанных переходах.

На рис. 3, 4 представлены результаты измерений коэффициента поглощения κ_{ν} в БИК-ВУФ спектральном диапазоне. Погрешность измерений в коротковолновой области достигает 40...50%. Поведение коэффициента поглощения вблизи интенсивных линий в спектральном интервале $\lambda \sim 130 \dots 170$ нм показывает, что сильно уширенные линии вносят большой вклад в значение коэффициента непрерывного

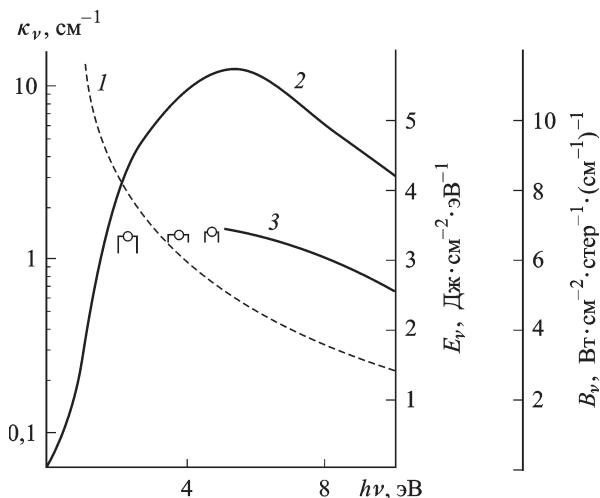


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициентов непрерывного поглощения $(\text{CH}_2\text{O})_n$ -плазмы:

1 — коэффициент непрерывного поглощения κ_ν ; 2 — спектральная яркость B_ν (расчет); 3 — плотность энергии излучения E_ν (эксперимент)

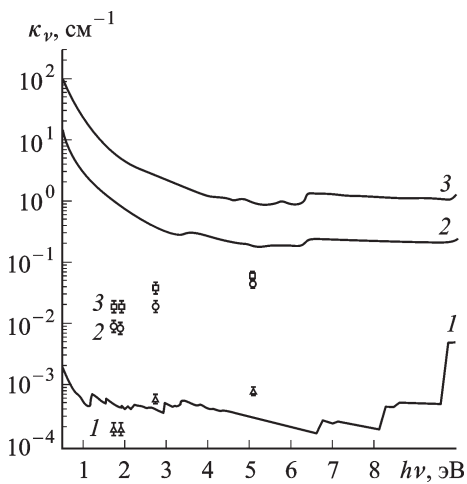


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициента непрерывного поглощения $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ -плазмы:

кривые 1 — $T_e \sim 1,23$ эВ, $n_e \sim 4,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 — $T_e \sim 4,3$ эВ, $n_e \sim 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 3 — $T_e \sim 3,5$ эВ, $n_e \sim 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (расчет); точки 1, 2, 3 — результаты эксперимента при тех же условиях

зависимостью коэффициента непрерывного поглощения плазмы κ_ν . Для подтверждения этого, а также для выяснения характера наблюдаемого эмиссионного спектра проведены расчеты коэффициентов непрерывного поглощения и спектров излучения плазмы $(\text{CH}_2\text{O})_n$ -, $(\text{CH}_2)_n$ - мишеней. В общем случае вычисление коэффициента погло-

поглощения, изменение коэффициента поглощения в диапазоне длин волн, соответствующем энергии квантов 20...30 эВ, обусловлено фотоионизацией однократных ионов с основного и группы нижних смещенных уровней, поэтому для корректного сопоставления экспериментальных данных с расчетными было необходимо проведение вычислений коэффициентов поглощения κ_ν с учетом вклада линейчатого излучения.

Как следует из полученных ранее результатов по исследованию эмиссионных характеристик, с увеличением энергии квантов яркостная температура приповерхностной лазерной плазмы уменьшается, что обусловлено спектральной

щения представляет сложную задачу, поскольку требует учета различного типа переходов, в том числе свободно-связанных и связанно-связанных, для расчета которых необходимо знание точных волновых функций атомов и ионов. Однако в условиях высоких плотностей и температур (а именно эти условия и реализуются в оптических разрядах) из-за сильного взаимодействия частиц плазмы между собой и с излучением часто достаточно учесть только непрерывное излучение или в приближении водородоподобности атомов и ионов или же с учетом индивидуальной структуры термов введением дополнительных поправочных функций или коэффициентов. Расчет спектров излучения плазмы сложного химического состава в диапазоне энергий квантов $h\nu \sim 0,1 \dots 70$ эВ проведен при характерных параметрах среды: $T_e \sim 2 \dots 4,5$ эВ и $n_e \sim 10^{18} \dots 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Состав лазерной плазмы определяли из решения системы уравнений Саха для последовательных ступеней ионизации совместно с уравнениями квазинейтральности и постоянства состава, снижение энергии ионизации в плазме учитывалось согласно теории Дебая–Хюккеля, а необходимые для расчета значения статистических сумм и энергий ионизации рассчитывали приближенным методом; смещение порога фотоионизации учитывали по приближенной теории Инглиса–Теллера. Коэффициенты тормозного и фотоионизационного поглощения рассчитывались по приближенной теории, основанной на методе квантового дефекта, результаты расчетов приведены на рис. 5. . . 7.

Парциальная доля ионов различной кратности в суммарном коэффициенте непрерывного поглощения меняется в зависимости от спектрального диапазона. В ИК, видимой и ближней УФ областях

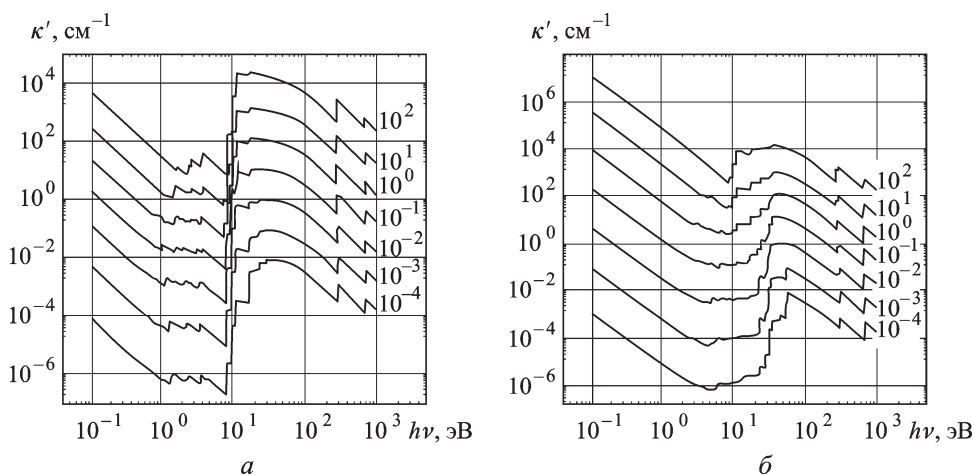


Рис. 5. Коэффициенты поглощения в непрерывном спектре плазмы фторопласта (C_2F_4)_n:
 а – $T \sim 1$ эВ; б – $T \sim 3$ эВ

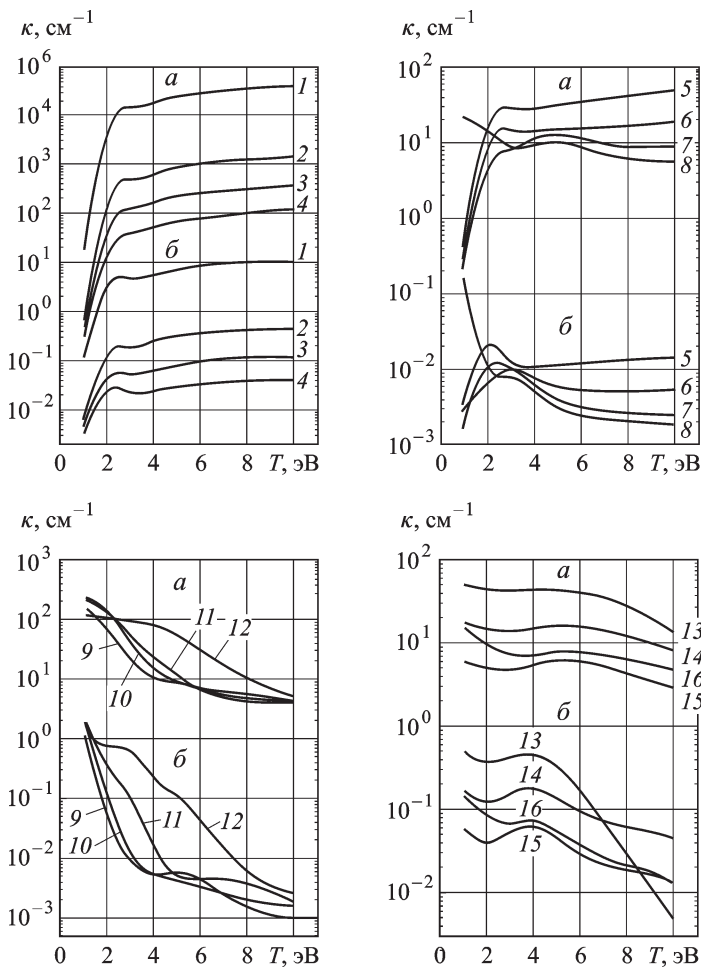


Рис. 6. Групповые среднепланковские коэффициенты поглощения плазмы полиформальдегида:

$h\nu = 0,1 \dots 0,232$ (1); $0,2232 \dots 1,22$ (2); $1,22 \dots 1,6$ (3); $1,6 \dots 3,08$ (4); $3,08 \dots 4,07$ (5); $4,07 \dots 7,05$ (6); $7,05 \dots 8,66$ (7); $8,66 \dots 10,89$ (8); $10,89 \dots 12,38$ (9); $12,38 \dots 18,59$ (10); $18,59 \dots 30$ (11); $30 \dots 55$ (12); $55 \dots 94$ (13); $94 \dots 170$ (14); $170 \dots 300$ (15); $300 \dots 700$ (16); $\rho = 10$ (a) и 10^{-2} (б)

спектра максимальный вклад дают однократно заряженные ионы, в далеком ультрафиолете существенную роль играют двукратные ионы. Как известно, спектр излучения приповерхностной низкотемпературной лазерной плазмы из элементов полимерного ряда с характерным размером плазменной области $\delta \sim 0,5 \dots 1$ см существенно отличается от планковского при температуре, равной температуре плазмы, что связано с оптической прозрачностью плазмы в области энергий квантов $2,7 < h\nu < 31$ эВ (оптическая толщина < 1). Сравнение расчетного спектра излучения с результатами оптических измерений в видимой и ближней УФ областях показывает, что измеренные как на отдельных длинах волн, так и в широких спектральных интервалах

значения спектральных яркостей достаточно хорошо ($\sim 20\%$) согласуются с расчетными излучательными характеристиками. Уменьшение яркостной температуры излучения при переходе от видимой к ближней УФ области связано с уменьшением оптической толщины плазмы, в области энергий квантов $h\nu > kT$ непрерывное излучение плазмы обусловлено тормозным и фоторекомбинационным механизмами. В ближней УФ области спектра доминирующими являются рекомбинационные механизмы, и спектр излучения плазмы определяется в основном фоторекомбинацией электронов на верхние возбужденные состояния однократно ионизованных ионов.

Полученные результаты являются разделом электронной базы данных оптических характеристик конструкционных материалов и активных сред ТОТ МГТУ, подробное описание структуры которой содержится в работе [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная плазменная динамика. Т. 1 / Под ред. Ю.С. Протасова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 860 с.
2. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том: В 4 кн. / Под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2001.
3. Experimental and theoretical Research of thermodynamic, optical and transport characteristics of dense plasma active media of complex chemical and structure composition / A.A. Alexeev, K.E. Bondarenko, A.A. Farafonov, D.I. Gusak, D.M. Mikhajlov, D.O. Nogotkov, A.P. Petrov, Yu.S. Protasov, Yu.Yu. Protasov, V.D. Telekh // V Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology. Contributed Papers. Vol. 1. – Minsk. 2006.
4. Голубев Е. Н., Пухов А. М., Смирнов В. Л. Получение и диагностика низкотемпературной эрозионной плазмы высокого давления // ЖТФ. – 1997. – Т. 67, № 4. – С. 126–128.
5. Коришев О. В., Ноготков Д. О., Протасов Ю. Ю., Гелех В. Д. Термодинамические, оптические и транспортные свойства рабочих веществ плазменных и фотонных энергетических установок. Т. 1 / Под ред. Ю.С. Протасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 640 с.

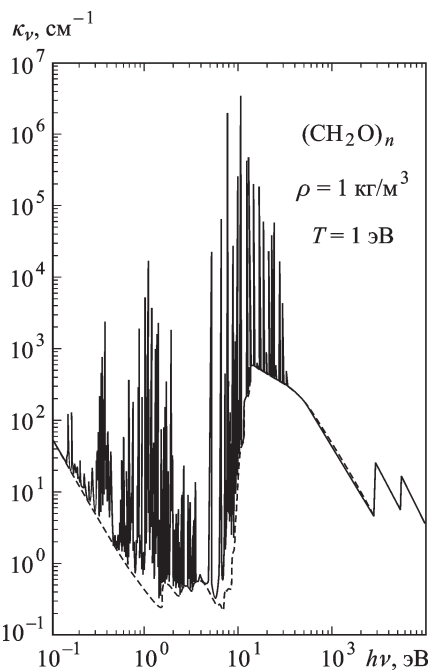


Рис. 7. Суммарный спектр коэффициента поглощения $(\text{CH}_2\text{O})_n$ -плазмы при $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$, $T = 1 \text{ эВ}$ (непрерывный спектр – штриховая кривая)

Статья поступила в редакцию 20.02.2008